







Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de agrosistemas tropicales en Tabasco, México

Carbon storage in aboveground biomass of tropical agrosystems in Tabasco, Mexico

Alfredo Isaac Brindis-Santos^{1,3} ,
Rufo Sánchez-Hernández² ,
Ena Edith Mata-Zayas^{3*} ,
David Jesús Palma-López⁴ ,
Facundo Sánchez-Gutiérrez⁵ ,
Luisa del Carmen Cámara-
Cabral³ 

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Campus IV. Universidad Autónoma de Chiapas. Entronque Carretera Costera y Huehuetán Pueblo CP. 30660. Huehuetán, Chiapas, México.

²División Académica de Ciencias Agropecuarias. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Teapa Km. 25 R/A La Huasteca, Segunda Sección. CP. 86280. Villahermosa, Tabasco, México.

³División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya. CP. 86150. Villahermosa, Tabasco, México.

⁴Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina s/n. CP. 86500. Cárdenas, Tabasco, México.

⁵Facultad Maya de Estudios Agropecuarios. Universidad Autónoma de Chiapas. Carretera Catazajá-Palenque Km4. CP. 29980. Catazajá, Chiapas, México.

*Autor de correspondencia: ena.mata@ujat.mx

Artículo científico

Recibido: 13 de marzo 2020

Aceptado: 16 de diciembre 2020

Como citar: Brindis-Santos AI, Sánchez-Hernández R, Mata-Zayas EE, Palma-López DJ, Sánchez-Gutiérrez F, Cámara-Cabral LC (2020) Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de agrosistemas tropicales en Tabasco, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 7(3): e2532. DOI: 10.19136/era.a7n3.2532

RESUMEN. El secuestro de carbono en la biomasa aérea de los agrosistemas es una alternativa para mitigar el cambio el cambio climático y la regulación climática. Hay 102 000 ha de palma de aceite (*Elaeis guineensis* J.) establecidas en el sureste mexicano, las cuales tienen potencial de secuestro de carbono (C). El objetivo del estudio fue estimar el almacenamiento de C en la biomasa aérea de los agrosistemas de palma de aceite de cinco, ocho y 18 años, pastizales y vegetación secundaria ubicados en la Sierra de Tabasco, México. La biomasa aérea total (BAT) en los agrosistemas de palma de aceite (PA) y vegetación secundaria (VS) se calcularon con ecuaciones alométricas, mientras la cantidad de C almacenada se estimó por interpolación. Para estimar el contenido de C en pastizales (PZ), se realizó una interpolación a partir de la producción de materia seca. La BAT más alta en los agrosistemas de palma de aceite se observó en PA18 con 106 Mg ha⁻¹, seguido de PA8 y PA5, con 61 y 48 Mg ha⁻¹, respectivamente. La captura de C se estimó en 60.05, 28.54 y 19.19 Mg C ha⁻¹, respectivamente. La vegetación secundaria registró los valores más altos de BAT y C total, mientras que los pastizales mostraron los valores más bajos. La BAT de los agrosistemas de PA funciona como grandes reservas de C con respecto a los PZ, pero menores cuando se compara con VS.

Palabras clave: Agrosistemas tropicales, biomasa aérea, ecuaciones alométricas, palma de aceite.

ABSTRACT. Carbon sequestration in aboveground biomass from agrosystems is an alternative for Global Climate Change mitigation and climate regulation. There are 102 000 ha of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) established in the Mexican southeast, these palms have potential for carbon sequestration (C). The aim of this study was to estimate the C storage in the aerial biomass of oil palm agrosystems (from five, eight and 18 years old), pastures and secondary vegetation from the Sierra de Tabasco, Mexico. Total aerial biomass (BAT) in oil palm (PA) and secondary vegetation (VS) agrosystems was calculated using allometric equations, whereas the amount of C stored was estimated by an interpolation. To estimate C contents in pastures, an interpolation was estimated from dry matter production. The highest BAT values of oil palm were observed in PA18 agrosystems with 106 Mg ha⁻¹, followed by PA8 and PA5, with 61 and 48 Mg ha⁻¹, respectively. Capture of C is estimated of 60.05, 28.54 and 19.19 Mg C ha⁻¹ respectively. The VS recorded the highest values of BAT and total C, while the pastures shown the lowest values. It is concluded that the BAT of the agrosystems of PA function as major C stores regarding to pastures, but lower compared to VS.

Key words: Aerial biomass, allometric equations, oil palm, tropical agrosystems.

INTRODUCCIÓN

La biomasa aérea en sistemas forestales, sistemas agroforestales y sistemas agrícolas es necesaria para usos comerciales (madera, fibra, biocombustibles, entre otras) y para evaluar los cambios de uso del suelo con respecto a los flujos del ciclo del carbono (C) (Aholoukpè *et al.* 2018, Fernandes *et al.* 2018). La evaluación del almacenamiento de C en sistemas agrícolas y cultivos perennes ha tomado cada vez más importancia ante la preocupación por reducir los gases de efecto invernadero que ocasionan el calentamiento global (Chávez-Aguilar *et al.* 2016, Salvador-Morales *et al.* 2019). La producción de biomasa aérea es una alternativa para la regulación del clima a través del secuestro del dióxido de carbono (CO₂), ya que la biomasa refleja las condiciones sanitarias y ambientales en un agrosistema (Sinha *et al.* 2015). La absorción de CO₂ mediante la fotosíntesis es un proceso biótico de las plantas y al mismo tiempo funcionan como almacén de carbono a través de la parte leñosa, hojas y raíces, que posteriormente se convierten parcialmente en materia orgánica (Avendaño *et al.* 2009).

En el estado de Tabasco, México, la presión ejercida por las actividades antrópicas entre 1965 y 1996, ocasionaron la pérdida de biodiversidad en ecosistemas tropicales, así como la disminución de la superficie boscosa (Vargas-Simón *et al.* 2019). Esta situación ha favorecido el crecimiento de pastizales y cultivos perennes en la región. Entre estos cultivos, la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) ha tenido un incremento del 30% de superficie en los últimos 11 años en el sureste mexicano, por lo que la superficie de este cultivo pasó de ocupar 30 034.77 ha en el 2007 a 101 753.22 ha en el 2018 (SIAP 2019). Sin embargo, esta expansión ha provocado controversias con relación a los impactos sociales y ambientales que trae consigo su cultivo (Ávila y Ávila 2015, Isaac-Márquez *et al.* 2016). Por ejemplo, se argumenta que el óxido nitroso (N₂O) es el gas de efecto invernadero que más se libera durante la etapa del ciclo de vida del cultivo de palma (30 años) por el exceso de la aplicación de fertilización nitrogenada (Chase *et al.* 2010, Rivera-Méndez *et al.* 2017). Por otro

lado, una plantación de *E. guineensis* Jacq. funciona como sumidero de C, y puede ayudar a contrarrestar el efecto provocado por el N₂O (Lamade y Bouillet 2005, Pulhin *et al.* 2014). En este mismo sentido Kotowska *et al.* (2015) argumentan que a partir de la biomasa de la palma de aceite (estípites, hojas y raíces) se puede almacenar hasta 78 Mg C ha⁻¹. Mientras que Pulhin *et al.* (2014) reportaron un potencial del cultivo de 55 Mg C ha⁻¹ capturado en la biomasa aérea. En México son escasos los estudios para estimar el potencial de captura de C en palma de aceite. Un estudio para medir la biomasa y el C capturado en palma de aceite de 12 años mostró un potencial de almacenamiento promedio de 76.18 ± 0.047 Mg C ha⁻¹ y tasa media de fijación anual de 6.53 Mg C ha⁻¹ (Ramos-Escalante *et al.* 2018).

Actualmente, el empleo de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea de las palmas, representa una alternativa más factible que el uso de métodos destructivos, ya que permiten evaluar la tasa de crecimiento y la producción de materia seca; lo que facilita el seguimiento a largo plazo y contribuye a mitigar la liberación de CO₂ a la atmósfera debido a que no hay derribe de las palmas (Aholoukpè *et al.* 2013, Aholoukpè *et al.* 2018). En contraste, los métodos de muestreo directos implican procedimientos complicados, destructivos y costosos, que además son sensibles a la variación individual, debido al número limitado de palmas que se utilizan (Kho y Jepsen 2015). Dado que *E. guineensis* Jacq. es un cultivo de interés agrícola y ambiental, resulta relevante estimar la cantidad de biomasa aérea que produce, así como el potencial de captura de C de este cultivo a través del tiempo. Por lo tanto, el objetivo del estudio fue estimar la biomasa aérea total y la cantidad de Carbono almacenado en el agrosistema de palma de aceite y comparar ambas variables con pastizales cultivados, debido a que son el uso de suelo dominante en la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se realizó en los municipios de Jalapa y Tacotalpa, ubicados en la región de la Sierra

en el estado de Tabasco, México. El área de estudio se ubica en la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo del Sur y está conformada por planicies y terrazas (Zavala-Cruz *et al.* 2016). Tiene una extensión de 7 080 ha, entre las coordenadas 17° 31' 57", 17° 47' 44" LN y 92° 42' 55", 92° 54' 22 LO. Limita al norte con los municipios de Macuspana y Centro, al sur y al este con el estado de Chiapas y al oeste con los municipios de Teapa y Centro (INEGI 2017). La geomorfología del área se forma por relieve modelado de Terrazas y Lomeríos, dominados por procesos de erosión e intemperización, asociados a rocas sedimentarias detrítica y brecha andesítica de edad entre Terciario (Paleooceno) y Cuaternario (Pleistoceno), con alturas de 7 a 70 msnm y pendientes menores de 30% (SGM 2008, Zavala-Cruz *et al.* 2016). La hidrología está conformada por las cuencas de los ríos Grijalva, Pichucalco, Teapa, Puyacatengo, Puxcatán, Chinal, La Sierra y Tacotalpa (INEGI 2017). El clima se caracteriza por ser cálido húmedo con abundantes lluvias en verano Am(f) en Jalapa y cálido húmedo con lluvias todo el año Af(m) en Tacotalpa, con precipitación media de 2 500 a 4 500 mm por año, y temperatura media de 26°C (Palma-López *et al.* 2007, INEGI 2017). Se seleccionaron agrosistemas de palma de aceite (PA) de diferentes edades, vegetación secundaria o acahuals (VS) y pastizales (PZ).

Selección de sitios de muestreo

Para seleccionar los sitios de muestreos, se consideró el estudio geopedológico a escala 1:50 000 elaborado por Brindis-Santos *et al.* (2020) del área de estudio. Los suelos predominantes desarrollan tres horizontes genéticos A/B/C de grupos Luvisoles (LV) y Lixisoles (LX), dominado anteriormente por pastizal de *Brachiaria humidicola* (Rendle Schweick) según información proporcionada por los productores. Pero con apoyo federal, en el año de 1997 estos paisajes fueron sustituidos por el cultivo de palma de aceite (*E. guineensis*). Las unidades de muestreo (UM) seleccionadas fueron: plantaciones de palma de aceite *E. guineensis* de cinco años (PA5), de ocho años (PA8) y de 18 años (PA18), pastizales de más de 20 años (PZ) y como tratamiento control vegetación

secundaria de 20 años (VS). La VS se consideró la más cercana a la vegetación original y, por lo tanto, la más cercana al tiempo cero, esto debido a que entre 1973 y 2003 se perdió el 80% de la vegetación original de selva alta perennifolia (Salazar-Conde *et al.* 2004). Cada unidad de muestreo (UM) contó con cuatro repeticiones distribuidas al azar en el área de estudio.

Muestro de vegetación

En cada UM se establecieron cuadrantes de 1 200 m² (20 x 60 m) donde se realizó un inventario de especies arbóreas y se midió el diámetro y la altura. El diámetro normal (1.3 m sobre el suelo) se midió con una cinta diamétrica, mientras que la altura se estimó mediante una pistola Haga. Cada UM de *E. guineensis* estuvo conformada por 12 palmas distanciadas a 9 m entre sí, con un arreglo topológico conocido como tres bolillos, que significa una disposición en forma de triángulo equilátero. Para el caso de la VS el diámetro normal mínimo (diámetro natural DN) fue mayor o igual de 7 cm, de acuerdo con lo sugerido para captura de carbono en bosques tropicales (Rügnitz *et al.* 2009, Cerda *et al.* 2013, PMC 2016). Durante el inventario en la VS a cada individuo se le asignó un número y fueron marcados con etiquetas de aluminio, las cuales se sujetaron evitando dañar los árboles; se registraron los nombres comunes de las especies. Se colectaron especímenes botánicos (hoja, tallo, flor y frutos) para determinar los nombres científicos por especialistas del Herbario de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Para el muestreo del PZ, se utilizó un marco cuadrado de 1 m² (100 cm x 100 cm). El proceso consistió en soltar de forma aleatoria el marco dentro de la parcela de 20 m de ancho por 60 m de largo equivalente a 1 200 m² (Cerda *et al.* 2013) en cuatro repeticiones. En seguida se procedió a cortar con tijeras el material vegetativo total a ras del suelo y se registró su peso fresco. De cada muestra fresca se obtuvieron sub-muestras de aproximadamente (200 g) que se guardaron en bolsas de papel estraza previamente etiquetadas, las cuales se transportaron al Laboratorio de suelos, plantas y aguas del Colegio de

Postgraduados, Campus-Tabasco. El secado de los pastos se realizó en una estufa de aire forzado a 60° C hasta obtener peso constante, para luego determinar la diferencia del porcentaje de materia seca, entre los pesos iniciales y finales de las muestras (Rügnitz *et al.* 2009).

Estimación de Carbono de la biomasa aérea en palma de aceite

Para cuantificar el carbono de la biomasa aérea asociada a la palma de aceite se utilizó la ecuación alométrica propuesta por Ramos-Escalante *et al.* (2018), la cual se describe como: $B = 98.349 \cdot h + 737.41$, en donde B es la biomasa aérea estimada (kg árbol^{-1}), h es la altura total en m y para las hojas se estimó como el equivalente al 65% de la biomasa del estípite (Brown 1997). Con la finalidad de determinar el porcentaje de C en cada parte fisiológica de la palma de aceite, se obtuvieron muestras del estípite (1.3 m sobre el suelo) y de las hojas 9, 17 y 25 de cada planta (Ng, 2003b), se seleccionaron seis folíolos de la parte media (tres de ambos lados) y una fracción de 5 cm de raquis (RQ) de la parte central de la hoja. El contenido de C en las muestras de biomasa (tallos y hojas) se determinó con un analizador automático de C y N (Perkin Elmer, Serie II, 2400).

Estimación de Carbono de la biomasa aérea en Vegetación Secundaria

Para determinar el C de la biomasa arbórea de la vegetación secundaria (VS), se utilizó la ecuación $B = 0.0673 \cdot X (\rho D^2 H) 0.976$ propuesta por Chave *et al.* (2014), en donde B es la biomasa aérea estimada (kg árbol^{-1}), D es el diámetro normal (cm), H es la altura total en m, y ρ es la densidad de la madera en g cm^{-3} . Los valores de densidad de la madera se obtuvieron a partir de la Global Wood Density Database (Zanne *et al.* 2009, Ordoñez *et al.* (2015). Para el cálculo del contenido de C en la biomasa arbórea de PA y VS, se empleó la fórmula propuesta por el IPCC (2003): $C = B \cdot FC$, donde C es el carbono en la biomasa arbórea (kg), B es la biomasa arbórea (kg) y FC Fracción de C (0.05).

Estimación de Carbono de la biomasa en pastizales

Para estimar el contenido de C en la vegetación no arbórea PZ, se utilizó la fórmula propuesta por Rügnitz *et al.* (2009). El cual se calcula a partir del tamaño del marco (100 cm x 100 cm) convirtiendo las unidades de muestro de kg C a t C mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta C_{BN} (\text{t C ha}^{-1}) = (1000 \text{m}^2 | 1 \text{m}^2) \times (\sum \Delta C_{BN \text{muestras}} | \text{número de muestras}) / 1000$$

Donde: ΔC_{BN} = Cantidad de carbono en la biomasa de vegetación no arbórea (t C ha^{-1}), $\Delta C_{BN \text{muestras}}$ = sumatoria de la cantidad de carbono de todas las muestras, (Kg C m^{-2}), Factor 1000 = conversión de las unidades de la muestra de kg MS a t MS y Factor 10000 = conversión del área a hectárea. Con base en los resultados de C en los tratamientos, se realizaron extrapolaciones para estimar la cantidad de C ha^{-1} y la tasa de fijación anual.

Análisis de los datos

Para determinar significancia estadística en el almacenamiento de carbono en los diferentes tratamientos, los datos fueron analizados mediante estadística paramétrica, realizando un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de media por Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$, usando el paquete estadístico Statgraphics® centurión XVI.

RESULTADOS

Estimación de la biomasa área en la palma de aceite

La biomasa aérea total (BAT) promedio en PA fue de $1.44 \pm 0.6 \text{ Mg planta}^{-1}$ en el PA5 años, $1.83 \pm 0.9 \text{ Mg planta}^{-1}$ en PA8 años y $3.16 \pm 1.2 \text{ Mg planta}^{-1}$ en el PA18 años, correspondientes a 48, 61 y 106 Mg de BAT ha^{-1} , respectivamente (Tabla 1 y Figura 1). Las menores cantidades de BAT se encontraron en PA5 y PA8 años, y el mayor valor fue en PA18 años indicando que la mayor BAT se encuentra en plantas adultas. Esto ocurre, a pesar de que el diámetro normal (DN) promedio del PA5 y PA8 años

Tabla 1. Datos dasométricos en tres edades de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. en la región Sierra de Tabasco, México (Valor de las medias \pm desviación estándar).

Edad (Años)	DN (cm)	Ap (m)	BAT (Mg)	C total (%)	Mg C ha ⁻¹
5	79.5 \pm 5.7	1.4 \pm 0.03	1.44 \pm 0.6	39.5 \pm 7.5	348.8 \pm 1.3
8	81.1 \pm 8.1	3.8 \pm 0.58	1.83 \pm 0.9	47.2 \pm 9.0	520.2 \pm 26.9
18	74.1 \pm 6.6	12.0 \pm 0.71	3.16 \pm 1.2	50.2 \pm 10.5	1091 \pm 39.9

n = 12 plantas por edad de la plantación. El porcentaje de carbono total, se obtuvo a partir de una muestra del tallo. Diámetro normal (DN), Altura de plantas (Ap), biomasa aérea total (BAT). La cantidad de C por planta se obtuvo a partir de la estimación de biomasa del tallo.

son superiores respecto al PA18 años (Tabla 1).

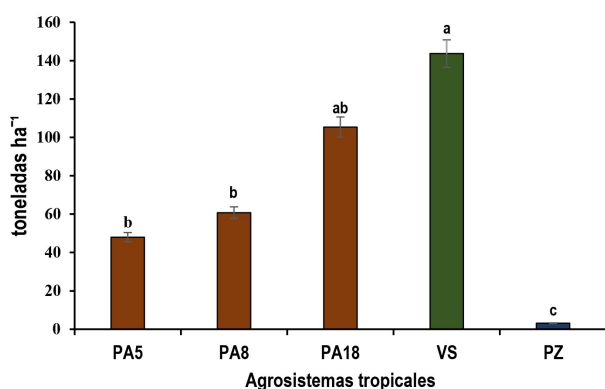


Figura 1. Estimación de la biomasa aérea total en agrosistema tropicales en Tabasco, México. Letras diferentes entre agrosistemas representa diferencia significativa ($p < 0.05$). PA5 = palma de aceite de cinco años; PA8 = palma de aceite de ocho años; PA18 = palma de aceite de dieciocho años; VS = vegetación secundaria y PZ = pastizales.

Biomasa aérea y potencial de captura de C en palma de aceite de diferentes edades

La estimación del porcentaje de C en el agrosistema de *E. guineensis*, mostró que el mayor porcentaje se observa en los estípites (EST) con respecto a los folíolos (FL) y el raquis (RQ); en PA5 años fue de 39.7%, en PA8 años de 45.9% y en PA18 años de 54.9% (Tabla 2). Mientras tanto, los FL de las plantas de PA5 registraron mayor porcentaje de C con 51.3% y los valores más bajos fueron en PA8, similar con las PA18 años entre 36.7 a 38.8% (Tabla 2). En el RQ los promedios fueron los más bajos y oscilaron entre el 27% en PA5 hasta 28.6% en PA18 años (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido de Carbono (%) en diferentes partes fisiológicas de la palma de aceite en Tabasco, México (media \pm desviación estándar).

Edad (años)	EST	FL	RQ
5	39.7 \pm 8.7	51.3 \pm 3.8	27.0 \pm 5.6
8	45.9 \pm 5.5	36.7 \pm 8.3	25.6 \pm 10.4
18	54.9 \pm 6.5	38.8 \pm 9.1	28.6 \pm 5.0

Abreviaturas: Estípites (EST), Folíolos (FL), Raquis (RQ), n12 = número de plantas por cada edad de plantación.

El agrosistema de palma de aceite, tiene un potencial de captura de C de 19.20 Mg C ha⁻¹ en PA5, 28.55 Mg C ha⁻¹ en PA8 y 60.08 Mg C ha⁻¹ en PA18; el 62% se concentra en el tallo (Estípites) y el 48% en las hojas (Tabla 2). La tasa media de fijación anual de carbono fue de 3.9 Mg C ha⁻¹ en PA5; 9.5 Mg C ha⁻¹ en PA8, y 6.1 Mg C ha⁻¹ en PA18 años (Figuras 1 y 2).

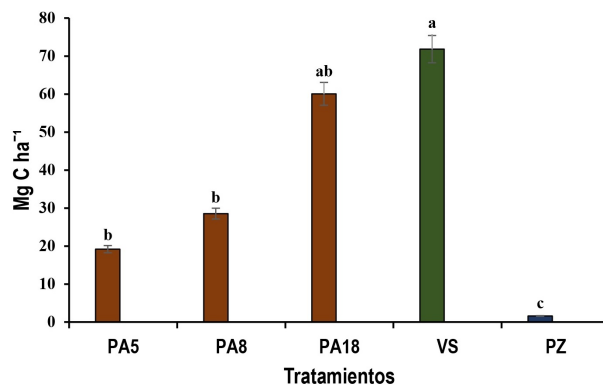


Figura 2. Carbono almacenado en la biomasa de agrosistemas tropicales. Letras diferentes entre tratamientos representan diferencia significativa ($p = 0.05$). PA5 = palma de aceite de cinco años; PA8 = palma de aceite de ocho años; PA18 = palma de aceite de dieciocho años; VS = vegetación secundaria y PZ = pastizal.

Biomasa y carbono en la vegetación secundaria

En la vegetación secundaria (VS) la biomasa aérea total se obtuvo a partir de una muestra de 196 árboles correspondientes a 14 familias, y se encontraron cuatro especies más frecuentes: *Thevetia ahouai*, *Vochysia guatemalensis* J.D. Smith, *Alibertia edulis* y *Enterolobium cyclocarpum*, cuyos diámetros variaron de 7.6 a 76 cm; el 80% se concentró en las clases diamétricas de 7 a 34 cm (Figura 3). En relación con la altura, la mayoría se concentran en las clases de 5 a 11 m, 12 a 17 m y 30 a 35 m, en estas tres clases se concentró el 76% del total de los árboles (Figura 4). La VS registró la mayor cantidad de biomasa aérea total de los cinco tipos de agrosistemas muestreados, con un total de 143.65 Mg ha⁻¹ correspondiente a un secuestro de C de 72 Mg ha⁻¹ durante 20 años, lo cual significa un almacenamiento de C de 3.6 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Figuras 1 y 2).

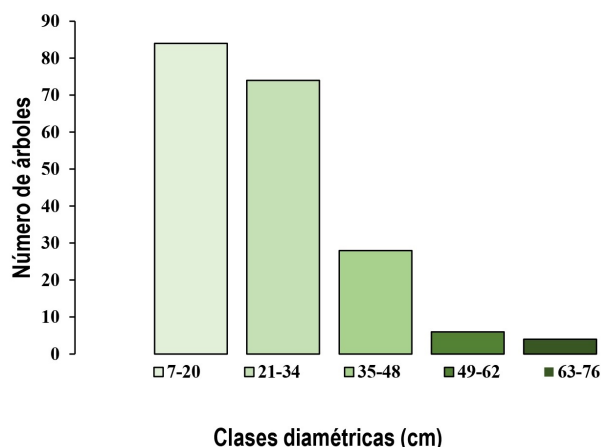


Figura 3. Número de árboles tropicales distribuidos por clase diamétrica en vegetación secundaria.

Biomasa y carbono en pastizales

La biomasa aérea del tratamiento PZ corresponde al pasto mejorado *Brachiaria humidicola* como monocultivo de más de 20 años, cuyo uso principal ha sido para alimentación de ganado bovino en pastoreo extensivo. Los datos obtenidos muestran niveles de biomasa de 2.9 hasta 3.3 Mg ha⁻¹ correspondiente a 1.6 Mg C ha⁻¹ en promedio. Este

sistema tiene muy baja tasa de fijación anual con 0.08 Mg C ha⁻¹; por lo tanto, es el agrosistema con menor capacidad de fijar C almacenado en la biomasa aérea total (Figura 1 y 2).

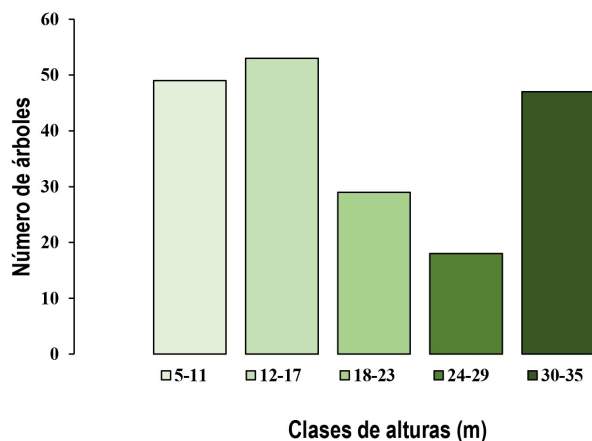


Figura 4. Número de árboles tropicales distribuidos por clases de altura en la vegetación secundaria.

DISCUSIÓN

La agricultura, y los cambios en el uso de suelo se encuentran entre los principales contribuyentes al Cambio Climático. Pero las prácticas agrícolas pueden potencialmente mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de mejores prácticas de manejo. Además, algunos agrosistemas perennes pueden almacenar C tanto en suelos como en la biomasa, lo que podría reducir las emisiones de GEI de la agricultura y contribuir a la mitigación del cambio climático (Ussiri y Lal 2017). El cultivo de la palma de aceite *E. guineensis* se ha expandido en los últimos años en el sureste de México, debido a la alta demanda que existe en el mercado por el aceite que de ella se obtiene (Isaac-Márquez et al. 2016, Abrams et al. 2019), y se estima que tiene potencial de captura de carbono ligado al potencial de formación de biomasa (Kho y Jepsen, 2015, Ramos-Escalante et al. 2018). En este estudio, se presentan las estimaciones de biomasa aérea y Carbono almacenado en agrosistemas de palma de aceite, y se compara con los valores estimados de vegetación se-

cundaria (como control) y pastizales, uso de suelo dominante en la zona. Además, se consideró como control la VS, debido a la pérdida de bosques tropicales en el área de desarrollo de las plantaciones de palma de aceite.

Biomasa aérea total en PA

La BAT por planta se incrementó con la edad del cultivo (Tabla 1). En las PA5 y PA8 años se presentaron los valores más bajos en la BAT entre 45.50 y 57.80% respectivamente, con respecto a los 3.16 ± 1.2 Mg planta⁻¹ en PA18 años. Los mayores contenidos de biomasa sobre el suelo se tuvieron en palmas adultas influyendo en mayor proporción la altura; debido a que el crecimiento en diámetro de esta oleaginosa tiene lugar en los primeros 3 y 4 años de edad, durante la formación de la base del tallo cuyo diámetro ya no aumentará una vez que haya alcanzado entre 40 y 60 cm de DN (Aholoukpè *et al.* 2013, Aholoukpè *et al.* 2018). Lo anterior, quedo de manifiesto en el valor promedio en altura de 12.0 ± 0.71 m en las PA18, que fue superior con respecto a las PA5 con 1.4 ± 0.03 m y PA8 años con 3.8 ± 0.58 m (Tabla 1). Estudios realizados en Sudamérica (Goodman *et al.* 2013) y en Malasia (Asari *et al.* 2013, Sanquetta *et al.* 2015) sugieren que la biomasa aérea se correlaciona de forma significativa con la edad y la longitud del tallo, similar a lo encontrado en el presente estudio. Mientras que Ramos-Escalante *et al.* (2018) en el soconusco, Chiapas, en la biomasa aérea de un sistema de aproximadamente 12 años, encontraron que la BAT fue de $1\ 104.34 \pm 87.85$ kg planta⁻¹. Resultados que son similares a los tratamientos en el cultivo en PA5 y PA8 años cuando el agrosistema tiene una edad joven. En tanto que Aranda-Arguello *et al.* (2018) estimaron la biomasa aérea promedio en palmas de 12 años en diferentes regiones de Chiapas en $1\ 877.3$ kg planta⁻¹, valores que son similares a los encontrados en PA5 y PA8 años, pero por debajo de los 3.16 Mg por planta⁻¹ obtenido en PA18 años (Tabla 1). Al respecto, Khalid *et al.* (1999) mencionan que en plantaciones de palma de aceite de 23 años con diámetro natural (DN) en promedio de 43 cm y altura total de 7.48 m con método directo, tuvieron en promedio 627 kg planta⁻¹. Lo que contrasta con

los promedios obtenidos en la presente investigación cuando tienen una edad de PA5, PA8 y PA18 años; pero las variables de DN y altura están por debajo del promedio en el presente estudio (Tabla 1), por lo tanto, pudieran estar influyendo en el resultado antes mencionado. Otro factor decisivo es el crecimiento del estípite de la planta depende del origen genético de la palma (Ng *et al.* 2003a, Aholoukpè *et al.* 2018). En este mismo sentido Aholoukpè *et al.* (2018) argumentan que la variedad de DLM Deli × La Mé genotype, con edad entre 16 y 29 años, tienen una altura entre 3.8 y 9.2, valores que son similares a las encontradas por Khalid *et al.* (1999), lo cual explicaría los bajos contenidos en la biomasa aérea con respecto a las palmas de nuestro estudio. De acuerdo con Morel *et al.* (2011) el cultivo de *E. guineensis* después de los 20 años empieza con la abscisión de las bases peciolares, lo que según Khalid *et al.* (1999) representa alrededor del 22% de la biomasa del tallo. Lo que también podría explicar los bajos contenidos en la biomasa aérea en *E. guineensis* después de la edad de 20 años.

La edad de la PA y la biomasa aérea total por unidad de superficie

Con respecto a la edad del cultivo, se observó un incremento de la BAT (Figura 1), pasando de 48 a 61 Mg ha⁻¹ en palmas jóvenes de cinco y ocho años, hasta alcanzar 106 Mg ha⁻¹ a los 18 años. La BAT acumulada en las PA5 y PA8, es similar a los resultados de Kotowska *et al.* (2015) quienes reportan valores entre 37.3 y 47.3 Mg ha⁻¹ en plantaciones de 15 años. Mientras que Asari *et al.* (2013) en plantaciones de entre 6 y 23 años reportan promedios de 27.67, 55.06 y 73.66 Mg ha⁻¹ de BAT en plantaciones de producción intermedia, productiva y madura, respectivamente, por lo que los resultados de estos reportes son similares a los obtenidos en las palmas jóvenes (PA5 y PA8 años). De acuerdo con Corley *et al.* (1971) y Corley *et al.* (2003), las plantaciones menores a cinco años pueden alcanzar entre 85 y 90 Mg ha⁻¹ de BAT, es decir 50% más que los resultados registrados para PA5 y PA8 (Kho y Jepsen 2015). Por su parte, Khalid *et al.* (1999) estimó en 85 Mg ha⁻¹ la biomasa sobre el suelo en

plantaciones de 23 años, quienes reportan que es el estípote el componente que contribuye con el 48% aproximadamente con respecto a la BAT; mientras que Sanquetta *et al.* (2015) reportaron resultados similares, con 90 Mg ha⁻¹ en la BAT en la edad de 25 años. Al respecto, Klaarenbeeksingel (2009) menciona que la cantidad de biomasa aérea sobre las plantaciones de palma aceitera varían entre 50⁻¹00 Mg ha⁻¹ hacia el final de la vida útil de la plantación (20-25 años), por lo que estos contenidos de BAT son similares a los 106 Mg ha⁻¹ que se registraron en las plantaciones de PA18 años en esta investigación. La estimación de la biomasa área también ha sido calculada con herramientas de teledetección, con valores de 29.5 y 29.88 Mg ha⁻¹ en plantaciones de entre uno y cinco años en África Occidental mediante imágenes satelitales IKONOS (Thenkabail *et al.* 2004); mientras que Morel *et al.* (2012) registraron promedios de BAT de 25.5 y 40 Mg ha⁻¹ en plantaciones de cinco y 10 años, mediante el uso de imágenes ALOS PALSAR. En ambos casos, los valores fueron menores a los encontrados en esta investigación; sin embargo, sus resultados pueden ser producto de una subestimación derivada de la falta de verificación en campo, que corrobore la precisión de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la estimación de la BAT en plantaciones de palma de aceite.

Biomasa aérea y potencial de captura de C en palma de aceite

El almacenamiento de C en la biomasa de la palma de aceite depende principalmente de la edad, y se relaciona con factores edafoclimáticos (Leblanc *et al.* 2006, Lamade 2009). Los valores de la Figura 2, se calcularon a partir de una densidad de siembra 143 plantas ha⁻¹ en las PA5, PA8 y PA18 años; lo cual permitió estimar el potencial de captura de C con valores de 19.19, 28.54 y 60.05 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Así como la tasa media fija anual de 3.84, 9.51 y 6.01 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Los valores y la tasa fija anual son similares a los 22.68 Mg C ha⁻¹ en plantas jóvenes de siete años reportadas por Leblanc *et al.* (2006); así como 15.01, 23.6 y 53.0 Mg C ha⁻¹, reportadas en plantaciones entre cinco y 16 años (Ng *et al.* 1968). Otro estudio realizado por Cor-

ley *et al.* (1971), reportan que a los cinco años *E. guineensis*, tiene un potencial de captura de 14.95, a los 8 años de 18.6 y a los 18 años de 36.0 Mg C ha⁻¹. Mientras que Syahrudin (2005) al evaluar el C en plantaciones de 10, 20 y 30 años; obtuvo valores promedios de 35.4, 41.7 y 55.3 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Ambos resultados se asemejan en los contenidos de C del presente estudio (Figura 2). En contraste, Pulhin *et al.* (2014) y Ramos-Escalante *et al.* (2018), argumentan que *E. guineensis* tiene un potencial de captura de C de 55.0 y 76.18 Mg C ha⁻¹ en plantaciones de 9 y 12 años edad; valores que superan a lo observado en la presente investigación cuando el cultivo tiene una edad similar.

Los resultados sugieren que el cultivo de palma de aceite alcanza su punto máximo de captura de C entre los 8 y 18 años, donde la BAT alcanzó 29.0 y 60.0 Mg C ha⁻¹ (Figura 2), respectivamente. Sin embargo, cuando, el cultivo supera la edad de 20 años empieza a disminuir su potencial de almacenamiento de C. Al respecto, Khalid *et al.* (1999) mencionan que a la edad de 23 años el cultivo captura alrededor de 41.7 Mg C ha⁻¹; mientras que Henson (2003) indica que a los 25 años, la palma tiene un potencial de 25.7 Mg C ha⁻¹; en tanto que Adachi *et al.* (2011) mencionan que a los 27 años este sistema almacena 18.3 Mg C ha⁻¹ en la BAT, lo que correspondería a una disminución del 30, 60 y 70% , con respecto al valor de 60.0 Mg C ha⁻¹ almacenado a la edad de 18 años. De acuerdo con Henson, (2004) y Smith *et al.* (2012) la palma de aceite tienen una vida económica de 25 a 30 años; por ello, la disminución en la captura de C en la BAT se atribuye a diversos factores: 1) disminuye la producción de frondas de forma natural; 2) las bases de las frondas se pierden debido a la separación en el tallo; 3) presencia de enfermedades (Hashim y Tey 2008, Morel *et al.* 2011) y 4) manejo menos intensivo, provocando menor rendimiento de racimo de fruto fresco (RFF). Aunque el presente estudio no cuenta con palmas de edad mayor a los 20 años, los estudios antes mencionados indican que este sistema disminuye su BAT entre los 25 y 30 años, lo que explicaría el valor encontrado en palmas de 18 años.

Almacenamiento de C en la biomasa aérea en la vegetación secundaria y pastizal

El pastizal fue el agrosistema que almacenó menos carbono total. En contraste, la vegetación secundaria (VS) fue la que mayor C contiene en la BAT (Figura 2). El pastizal fue significativamente menor en su contenido total de C en comparación con los agrosistemas de palma de aceite en diferentes edades, mientras que la VS mostró ($p < 0.05$) el mayor valor con 72 Mg C ha^{-1} en la biomasa aérea y con tasa fija anual de 3.6 Mg C ha^{-1} (Figura 2). Se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) en el almacenamiento de carbono en biomasa aérea entre los agrosistemas evaluados. La VS presentó el mayor almacenamiento de carbono, seguido por las plantaciones de palma de aceite en diferentes edades (PA5 con 19.19, PA8 con 28.54 y PA18 con $60.05 \text{ Mg C ha}^{-1}$). El pastizal fue el agrosistema que aportó la menor cantidad de carbono en la biomasa aérea con 1.6 Mg C ha^{-1} al compararlo con los otros sistemas evaluados, con tasa fija anual de $0.08 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Figura 4). La VS presentó al valor de 72 Mg C ha^{-1} en la BAT (Figura 2). Estos resultados son similares a los reportados por Saldarriaga *et al.* (1988), Lapeyre *et al.* (2004) y Hughes *et al.* (2004). Al respecto Lapeyre *et al.* (2004) sugieren que las especies forestales cuyos DN son menores a 30 cm, son las responsables de almacenar hasta $62.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ de BAT en sistemas de VS con edad de 20 años, lo que concuerda con los resultados obtenidos en las clases diamétricas encontradas en esta investigación. Mientras que Saldarriaga *et al.* (1988) reportaron valores de 75 y 84 Mg C ha^{-1} en sistemas de VS de 9 y 12 años respectivamente; y Hughes *et al.* (1999), indicaron que dichos sistemas, al alcanzar una edad de entre 16-20 años, pueden acumular una BAT de 88-269 Mg C ha^{-1} .

Debido a la edad de la VS y a la diversidad de especies en este tipo de agropaisajes (Zamora-Crescencio *et al.* 2011, Carreón-Santos *et al.* 2014, López-Pérez *et al.* 2014), no es posible compararla con las plantaciones de palma de aceite a una edad específica. Sin embargo, se puede cuantificar las pérdidas de almacenamiento de C cuando se realiza

la conversión de VS al cultivo de palma de aceite. A partir del valor en la captura de C en la VS se observó que cuando el cultivo de palma de aceite tiene una edad entre cinco y ocho años, el almacén de C disminuye en promedio 67% en la BAT; en contraste, cuando llega a una edad de 18 años, reduce solo el 16%, con respecto a los Mg C ha^{-1} reportados en la VS. Por otro lado, el cambio de uso de suelo de VS a PZ, los Mg C ha^{-1} disminuyen en un 100% (Figura 4). Es importante mencionar que el almacenamiento de C aumenta más del 100% en las tres edades evaluadas del agrosistema de palma de aceite, cuando se hace la conversión de pastizal a palma de aceite. Ante la expansión de las plantaciones de palma aceitera en el país, es importante cumplir con la regulación interna y llevar a cabo un manejo sustentable del cultivo. El establecimiento de nuevas plantaciones debe limitarse a sitios que ya han sido deforestados y convertidos a cultivos o pastizales, evitando la deforestación de bosques tropicales y vegetación secundaria.

CONCLUSIONES

La biomasa aérea de agrosistemas de palma de aceite de diferentes edades (PA) en la zona sierra de Tabasco, México fue mayor en las plantas de palma de aceite de 18 años (BAT igual a 106 Mg C ha^{-1}) con respecto a las palmas jóvenes de cinco y ocho años. Asimismo, se observó que la BAT aumenta con la longitud del estípite, debido a que los contenidos de BAT y reservas de C aumentan con la edad del cultivo. El almacenamiento de carbono de los agrosistemas de Palma de aceite, vegetación secundaria y pastizal fue diferente en cada sistema. El carbono de la biomasa aérea se almacenó principalmente en la VS (72 Mg C ha^{-1}) debido a la diversidad de especies arbóreas presentes en este sistema; las palmas de aceite PA5, PA8 y PA18 almacenaron 19.19, 28.54 y $60.05 \text{ Mg C ha}^{-1}$ respectivamente, superando al agrosistema de Pastizal que acumuló 1.6 Mg C ha^{-1} en la BAT.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a AIBS para estudios de posgrado. Al National Science Foundation -

Partnerships in International Research and Education (PIRE) por el financiamiento para el trabajo campo a través del proyecto “Sustentabilidad, Servicios Ecosistémicos y Desarrollo de la Bioenergía en las Américas”.

LITERATURA CITADA

- Abrams, J, Pischke, EC, Mesa-Jurado, MA, Eastmond, A, Silva CA, Moseley C (2019) Between Environmental Change and Neoliberalism: The Effects of Oil Palm Production on Livelihood Resilience, Society & Natural Resources 32: 548-545.
- Adachi M, Ito A, Ishida A, Kadir WR, Ladpala P, Yamagata Y (2011) Carbon budget of tropical forests in Southeast Asia and the effects of deforestation: an approach using a process-based model and field measurements. Biogeosciences 8: 2635-2647.
- Aholoukpè H, Dubos B, Flori A, Deleporte P, Amadji G, Chotte JL, Blavet D (2013) Estimating aboveground biomass of oil palm: allometric equations for estimating frond biomass. Forest Ecology and Management 292: 122-129.
- Aholoukpè HNS, Dubos B, Deleporte P, Flori A, Amadji LG, Chotte JL, Blavet D (2018) Allometric equations for estimating oil palm stem biomass in the ecological context of Benin, West Africa. Trees 32: 1669-1680.
- Aranda-Arguello R, Ley-de-Coss A, Arce-Espino C, Pinto-Ruiz R, Guevera-Hernández F, Raj-Aryal D (2018) Captura de carbono en la biomasa aérea de la palma de aceite en Chiapas, México. Agronomía Mesoamericana 29: 629-637.
- Asari N, Suratman MN, Jaafar J, Khalid MM (2013) Estimation of aboveground biomass for oil palm plantations using allometric equations. Biology, Environment and Chemistry 58: 110-114.
- Avendaño DMH, Acosta MM, Carrillo FA, Etchevers JDB (2009) Estimación de biomasa y carbono en un bosque de Abies religiosa. Revista Fitotecnia Mexicana 32: 233-238.
- Ávila LER, Ávila AR (2015) Los agrocombustibles y el crecimiento verde en Chiapas, México. Revista Geonordeste 1: 249-273.
- Brindis-Santos AI, Palma-López DJ, Zavala-Cruz J, Mata-Zayas EE, López-Bustamante YI (2020) Paisajes geomorfológicos relacionados con la clasificación de los suelos en Planicies y Terrazas de Tabasco, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 72: 1-17.
- Brown S (1997) Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A Primer. A Forest Resources Assessment publication, FAO, Roma, Italia. 57 p.
- Carreón-Santos RJ, Valdez-Hernández JI (2014) Estructura y diversidad arbórea de vegetación secundaria derivada de una selva mediana subperennifolia en Quintana Roo. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 20: 119-130.
- Cerda B R, Espin CT, Cifuentes M (2013) Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. Agroforestería en las Américas 49: 33-41.
- Corley RHV, Tinker PB, (2003) The oil palm, 4th edition. Blackwell Science, Ltd. Oxford UK. 562p.
- Corley RHV, Hardon JJ, Tan GY (1971) Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) I. Estimation of growth parameters and application in breeding. Euphytica 20: 307-315.

- Chávez-Aguilar G, Ángeñes-Pérez G, Pérez-Suárez M, López-López MA, García-Moya E, Wayson C (2016) Distribución de biomasa aérea en un bosque *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 3: 23-26.
- Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, Chidumayo E, Colgan MS, Delitti WBC, Duque A, Eid T, Fearnside PM, Goodman RC, Henry M, Martínez-Yrizar A, Mugasha WA, Muller-Landau HC, Mencuccini M, Nelson BW, Ngomanda A, Nogueira EM, Ortiz-Malavassi E, Péliissier R, Ploton P, Ryan CM, Saldarriaga JG, Vieilledent G (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20: 3177-3190.
- Chase LD, Henson I E (2010) A detailed greenhouse gas budget for palm oil production. *International Journal of Agricultural Sustainability* 8: 199-214.
- Etchevers BJD, Monreal MC, Hidalgo MC, Acosta MM, Padilla CJ, López RR (2015) Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. 1ra ed. Colegio de Postgraduados, México. 29p.
- Fernandes CDA, Matsumoto SN, Fernandes VS (2018) Carbon stock in the development of different designs of biodiverse agroforestry systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 22: 720-725.
- Goodman RC, Phillips OL, del Castillo Torres D, Freitas L, Cortese ST, Monteagudo A, Baker TR (2013) Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management* 310: 994-1004.
- Hashim K, Tey CC (2008) An overview of the current status of *Ganoderma* basal stem rot and its management in a large plantation group in Malaysia. *The Planter* 84: 469-82.
- Henson IE (2003) The Malaysian national average oil palm: concept and evaluation. *Oil Palm Bulletin* 46: 15-27.
- Henson IE (2004) Estimating maintenance respiration of oil palm. *Oil Palm Bulletin* 48: 1-10.
- Hughes RF, Kauffman JB, Jaramillo VJ (1999) Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecology* 80: 1892-1907.
- INEGI (2017) Anuario estadístico y geográfico de Tabasco 2017: México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 440p.
- IPCC (2003) Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan. 595p.
- Isaac-Márquez, R, JL Sandoval Valladares, A Eastmond-Spencer, ME Ayala Arcipreste, MA Arteaga Aguilar, AP Isaac Márquez, MC Sánchez González (2016) Impactos sociales y ambientales de la palma de aceite: Perspectiva de los campesinos en Campeche, México. *Journal of Latin American Geography* 15: 123-146.
- Khalid H, Zin ZZ, Anderson JM (1999) Quantification of oil palm biomass and nutrient value in a mature plantation. I. Above-ground biomass. *Journal of Oil Palm Research* 11: 23-32.
- Kotowska MM, Leuschner C, Triadiati T, Meriem S, Hertel D (2015) Quantifying above-and belowground biomass carbon loss with forest conversion in tropical lowlands of Sumatra (Indonesia). *Global Change Biology* 21: 3620-3634.
- Kho LK, Jepsen M R (2015) Carbon stock of oil palm plantations and tropical forests in Malaysia: A review. *Singapore Journal of Tropical Geography* 36: 249-266.
- Klaarenbeeksingel FW (2009) Greenhouse gas emissions from palm oil production. Brinkmann Consultancy, Hoevelaken, The Netherlands. 57p.

- Lapeyre T, Alegre J, Arévalo L (2004) Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada* 3: 35-44.
- Lamade E, Bouillet JP (2005) Carbon storage and global change: the role of oil palm. *OCL. Oléagineux. Corps Gras Lipides* 12: 154-160.
- Leblanc H, Russo R, Cueva JJ, Subía E (2006) Fijación de carbono en palma aceitera en la región tropical húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical* 2: 143-148.
- López-Pérez D, Castillo-Acosta O, Zavala-Cruz J, Hernández-Trejo H (2014) Estructura y composición florística de la vegetación secundaria en tres regiones de la sierra norte de Chiapas, México. *Polibotánica* 37: 1-23.
- Morel AC, Saatchi SS, Malhi Y, Berry NJ, Banin L, Burslem D, Ong RC (2011) Estimating aboveground biomass in forest and oil palm plantation in Sabah, Malaysian Borneo using ALOS PALSAR data. *Forest Ecology and Management* 262: 1786-1798.
- Morel AC, Fisher J B, Malhi Y (2012) Evaluating the potential to monitor aboveground biomass in forest and oil palm in Sabah, Malaysia, for 2000-2008 with Landsat ETM+ and ALOS-PALSAR. *International Journal of Remote Sensing* 33: 3614-3639.
- Ng SK, Thamboo S, de Souza P (1968) Nutrient contents of oil palms in Malaya. II. Nutrients in vegetative tissues. *Malaysian Agricultural Journal* 46: 332-90.
- Ng SK, von Uexküll H, Härdter R (2003a) Botanical aspects of the oil palm relevant to crop management. En: Fairhurst T, Härdter R (eds) *Oil palm management for large and sustainable yields*. Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI). Singapore. pp: 13-26.
- Ng SK, Thong CK, Khaw CH, Ooi HSH, Leng KY, Kayaroganam P (2003b) Clonal oil palm production, yield performance, and nutritional requirements. En: Fairhurst T, Härdter R (eds) *The Oil palm management for large and sustainable yields*. Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI). Singapore. pp: 99-114.
- Ordóñez DJAB, Galicia NA, Venegas MNJ, Hernández TT, Ordóñez DM J, Dávalos-Sotelo R (2015) Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques* 21: 77-126.
- Palma-López DJ, Cisneros DJ, Moreno-Cáliz, E, Rincón-Ramírez JA (2007) Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable: Villahermosa, Tabasco, México, Colegio Postgraduados ISPROTAB-FUPROTAB. 184p.
- Pulhin FB, Lasco RD, Urquiola JP (2014) Carbon sequestration potential of oil palm in Bohol, Philippines. *Ecosystems and Development Journal* 4: 14-19.
- Programa Mexicano del Carbono AC (2015) Manual de procedimientos inventario de carbono+. estudio de factibilidad técnica para el pago de bonos de carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDO-MEX). Coordinador: Fernando Paz Pellat. Colaboradores: Fabiola Rojas-García, Julio Cesar Wong González y José Ignacio Pulido-Ponce. Texcoco, Estado de México. 57p.
- Ramos-Escalante G, Ley de-Coss A, Arce-Espino C, Escobar-España JC, Raj-Aryal D, Pinto-Ruiz R, Guevara-Hernández F, Guerra-Medina GE (2018) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia* 52: 671-683.
- Rivera-Méndez YD, Rodríguez DT, Romero HM (2017) Carbon footprint of the production of oil palm (*Elaeis guineensis*) fresh fruit bunches in Colombia: *Journal of Cleaner Production* 149: 743-750.

- Rügnitz MT, Chacón ML, Porro R (2009) Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales 1. eds. Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). Perú. 79p.
- Salazar-Conde EC, Zavala-Cruz J, Castillo-Acosta O Cámara-Artigas R (2004) Evaluación espacial y temporal de la sierra madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 54: 7-23.
- Saldarriaga J G, West DC, Tharp ML, Uhl C (1988) Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *The Journal of Ecology* 76: 938-958.
- Salvador-Morales P, Cámara-Cabrales LDC, Martínez-Sánchez JL, Sánchez-Hernández R, Valdés-Velarde E (2019) Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y Bosques* 25: 1. Do1: 10.21829/myb.2019.2511638.
- SGM (2008) Carta geológico minero: Estados de Chiapas y Tabasco, escala 1: 500 000. Servicio Geológico Mexicano. Pachuca, México.
- SIAP (2019) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2020.
- Sinha S, Jeganathan C, Sharma LK, Nathawat MS (2015) A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12: 1779-1792.
- Sanquetta CR, Péllico Netto S, Dalla Corte AP, Rodrigues AEL, Behlin A, Sanquetta MNI (2015) Quantifying biomass and carbon stocks in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Northeastern Brazil. *African Journal of Agricultural Research* 10: 4067-4075.
- Smith DR, Townsend TJ, Choy AW, Hardy IC, Sjögersten S (2012) Short-term soil carbon sink potential of oil palm plantations. *GCB Bioenergy* 4: 588-596.
- Syahrudin (2005) The potential of oil palm and forest plantations for carbon sequestration on degraded land in Indonesia. Cuvillier, Göttingen. Germany, Ecology and Development Series. 28: 108 pp
- Thenkabail PS, Stucky N, Griscom BW, Ashton MS, Diels J, Van Der Meer B, Enclona E (2004) Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing* 25: 5447-5472.
- Ussiri DA, Lal R. (2017) Greenhouse Gas mitigation under agriculture and livestock landuse. In: *Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation*. Springer, Cham. pp 343-394.
- Vargas-Simón G (2019) Resumen ejecutivo. Factores de presión. En: *La biodiversidad en Tbasco. Estudio de Estado*. Vol. III. CONABIO, México. pp: 17-19.
- Zamora-Crescencio P, Domínguez-Carrasco MDR, Villegas P, Gutiérrez-Báez C, Manzanero-Acevedo LA, Ortega-Haas JJ, Puch-Chávez R (2011) Composición florística y estructura de la vegetación secundaria en el norte del estado de Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 89: 27-35.
- Zanne AE, López-González G, Coomes DA, Ilic J, Jansen S, Lewis S, Miller R, Swenson N, Wiemann M, Chave J (2009) Global wood density database. Dryad. <https://datadryad.org/stash/dataset/doi:10.5061/dryad.234>. Fecha de consulta 15 de diciembre de 2019.
- Zavala-Cruz J, Jiménez-Ramírez R, Palma-López DJ, Bautista-Zúñiga F, Gavi-Reyes F (2016) Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3: 161-171.